



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH VENTILÁTORU PRO ELEKTRICKÉ STROJE

DESIGN OF FAN FOR ELECTRIC MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DALIBOR ŠVEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Dalibor Švec
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh ventilátorů pro elektrické stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ventilátory jsou důležitou součástí elektrických strojů, kde zajišťují průchod potřebného množství vzduchu. Cílem práce je navrhnout na základě jasně dané teorie a provedených měření s různými typy ventilátorů, jednoduchý návrhový kalkulátor . Výsledkem výpočtu podle tohoto kalkulátoru budou rozměry a tlaková charakteristika. Celý proces výpočtu je dán známou metodikou, která byla speciálně vytvořena pro ventilátory.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámení se s metodikou návrhu ventilátorů.
2. Zpracování kalkulátoru pro návrh ventilátoru.
3. Ověření výpočtu na základě měření
4. Analýza dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

Hak, J.; Ošlejšek, O.: Výpočet chlazení elektrických strojů . 1.díl. VUES Brno, 1973.

Ondruška, E.; Maloušek, A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha, 1985.

Idelčik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.

Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraw Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Úkolem této bakalářské práce je naprogramovat návrhový kalkulátor pro různé typy ventilátorů. Výsledkem bude kalkulátor schopný zobrazit nákres tvaru ventilátoru, vykreslit základní charakteristiky do grafu a vypsát čísla charakterizující daný ventilátor. Výpočet je založen na podobnostních číslech a jasně dané teorii, která byla vytvořena výhradně pro ventilátory.

Summary

Aim of this bachelor thesis is to program a design calculator for different types of ventilators. Calculator should be able to display design of ventilator, draw characteristics to a graph and show characteristic numbers of ventilator. Calculation is based on characteristic numbers and theory developed especially for ventilators.

Klíčová slova

ventilace, radiální ventilátor, podobnostní čísla, charakteristiky ventilátoru, grafické uživatelské prostředí, MATLAB

Keywords

ventilation, radial ventilator, characteristic numbers, characteristics of ventilator, graphical user interface, MATLAB

ŠVEC, D. *Návrh ventilátoru pro elektrické stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 36 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Návrh ventilátorů pro elektrické stroje* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Vlacha, Ph.D. s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Dalibor Švec

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu doc. Ing. Radkovi Vlachovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost a čas věnovaný mé bakalářské práci. Poděkování také patří mojí rodině a přátelům.

Dalibor Švec

Obsah

1	Úvod	12
2	Teorie	13
2.1	Ventilátor	13
2.1.1	Rozdělení ventilátorů	13
2.2	Rovnice kontinuity	14
2.3	Věta Bernoulliova	14
2.4	Podobnostní čísla	14
2.4.1	Tlaková charakteristika	14
2.4.2	Pracovní bod	15
2.4.3	Příkonová charakteristika	16
2.4.4	Účinnost	17
2.5	Fyzikální analogie s elektrickými obvody	18
2.6	MATLAB	19
3	Průběh výpočtu	20
3.1	Zvolení typu ventilátoru	21
3.2	Vstupní parametry	21
3.3	Výstupní parametry	22
3.3.1	Rozměry	22
3.3.2	Charakteristika	22
3.3.3	Uložení	25
4	Příklad	26
4.1	Ventilátor V2S3	26
4.2	Ventilátor V6	31
4.3	Ventilátor V11S1	32
5	Závěr	33
6	Seznam použitých zkratk a symbolů	35

1. Úvod

Problematika odvádění tepelných ztrát se u strojů začala řešit už v 19. století. Nejdříve byl odvod tepla opomíjen, ale s postupným snižováním hmotnosti a růstem výkonu strojů se ukázal jako nezbytná součást pro návrh stroje. V současné době se ventilátory nacházejí téměř ve všech odvětvích. Lze je najít například v elektrárnách, spalovnách, domácnostech, kancelářích a mnoha dalších. Aby byl ventilátor vhodně zvolen, musí kromě výkonnostních požadavků mnohdy splňovat i další kritéria. Těmi mohou být rozměry, do kterých bude ventilátor umístěn, nízká váha, hluk nebo cena.

Cílem této bakalářské práce je naprogramovat návrhový kalkulátor pro různé typy ventilátorů. Výsledkem bude program schopný zobrazit náčrtek tvaru ventilátoru, vykreslit základní charakteristiky do grafu a vypsát čísla charakterizující daný ventilátor. Tyto čísla bude možné uložit a dále s nimi pracovat. Výpočet je založen na podobnostních číslech a jasně dané teorii, která byla vytvořena speciálně pro ventilátory. Program by měl být taktéž přehledný a snadno ovladatelný.

První kapitola mé práce je věnována definici ventilátoru, jeho rozdělení a vymezení oblasti této bakalářské práce. Na začátku jsou rovněž uvedeny rovnice pro proudění, ze kterých vycházejí další výpočty. Také jsou vysvětlena podobnostní čísla a práce s nimi. Je rovněž zmíněna analogie mezi ventilátory a elektrickými obvody. Druhá kapitola je zaměřena na orientaci v uživatelském prostředí, jeho používání a zobrazení průběhu výpočtu. V poslední kapitole jsou uvedeny tři příklady. U prvního příkladu je uveden celý výpočet pro lepší názornost. Zbývající dva příklady jsou uvedeny pouze pro porovnání s prvním příkladem. Pro vytvoření uživatelského prostředí a provedení výpočtů byl použit software MATLAB, který obě tyto operace ovládá.

2. Teorie

2.1. Ventilátor

Obecná definice ventilátorů zní "Ventilátory jsou rotační lopatkové stroje, které jsou určeny ke kontinuální dopravě vzdušin při malých kompresních poměrech." [1].

Ventilátory jsou používány k dopravě vzdušin než kvůli pro jejich schopnost komprese. Jejich kompresní poměr se obecně pohybuje okolo 1 [6]. Pro vyšší kompresní poměry jsou využívána dmychadla nebo kompresory.

2.1.1. Rozdělení ventilátorů

Ventilátory jsou rozděleny na základě několika hledisek [5].

a) podle směru průtoku vzdušiny oběžným kolem

- axiální
- diagonální
- radiální
- diametrální

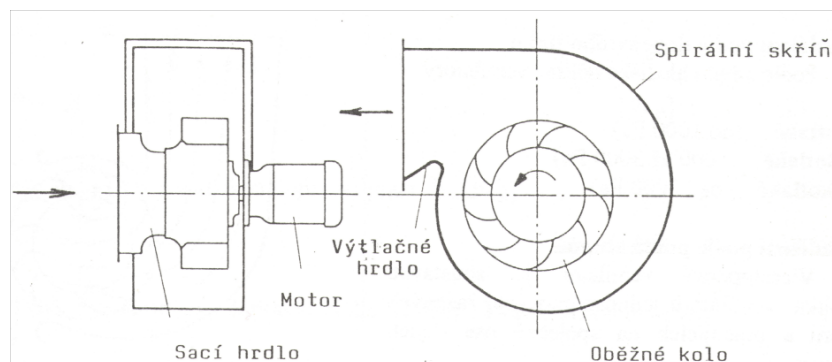
b) podle dopravního tlaku

- nízkotlaké
- středotlaké
- vysokotlaké

c) podle počtu stupňů

- jednostupňové
- vícestupňové

Tato bakalářská práce bude zaměřena pouze na část ventilátorů. Konkrétně to budou jednostupňové radiální ventilátory. Základní části ventilátoru jsou oběžné kolo, sací hrdlo, výtlačné hrdlo, spirální skříň a motor [5]. Všechny tyto části jsou k vidění na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Radiální ventilátor [5]

2.2. Rovnice kontinuity

Při předpokladu konstantních stavových veličin a nestlačitelné kapaliny je i objemový průtok konstantní[2]. Výsledný vztah bude vypadat

$$Q = vS = konst., \quad (2.1)$$

kde Q bude průtok, v rychlost proudění tekutiny a S průřez kanálu ventilátoru.

2.3. Věta Bernoulliova

Ve zjednodušeném tvaru, kde je zanedbán vliv tíhové síly a bude předpokládáno dokonalé proudění, věta Bernoulliova vypadá

$$p_s + p_d = p_c = konst., \quad (2.2)$$

kde p_s je statický tlak, p_d dynamický tlak a p_c je tlak celkový. Větu Bernoulliovu je možné vyjádřit případně ve tvaru

$$p_s + \rho v^2/2 = konst., \quad (2.3)$$

kde ρ je hustota tekutiny.

2.4. Podobnostní čísla

Při návrhu ventilátorů jsou používána podobnostní čísla z důvodu univerzálnosti. Tato čísla byla získána na základě měření nebo experimentů a jsou dále využívána pro základní návrh. U ventilátorů budou používána bezrozměrná podobnostní čísla. Bezrozměrná podobnostní čísla vychází zejména z parametrů ventilátoru jako například šířka lopatek b , vnější průměr D_2 , otáček ventilátoru n , objemovém průtoku Q a dopravním tlaku H [5]. Pro hustotu ρ budeme uvažovat vzduch, ale je možné případně využít i jiné chladicí médium.

2.4.1. Tlaková charakteristika

Tlaková charakteristika udává průběh tlaku na objemovém průtoku $H = f(Q)$ [2]. Tato závislost je aproximována pomocí polynomu 2°

$$H = H_0 - CQ - K_V Q^2, \quad (2.4)$$

kde H_0 je tlak naprázdno, CQ představuje snižování teoretické hodnoty tlaku vlivem vírů a člen $K_V Q^2$ je úbytek tlaku na vnitřním odporu ventilátoru. V bezrozměrném tvaru vypadá tlaková charakteristika [2]

$$\psi = \psi_0 - \sigma\varphi - \kappa\varphi^2, \quad (2.5)$$

kde ψ a ψ_0 jsou tlaková čísla, σ je vírové číslo, φ představuje objemové číslo a κ představuje odporové číslo.

Z mnoha měření se ukázalo, že aproximace polynomem 2° je příliš složitá, a proto bude používán polynom 2° bez lineárního členu, který se jeví jako dostačující[2]. Bude

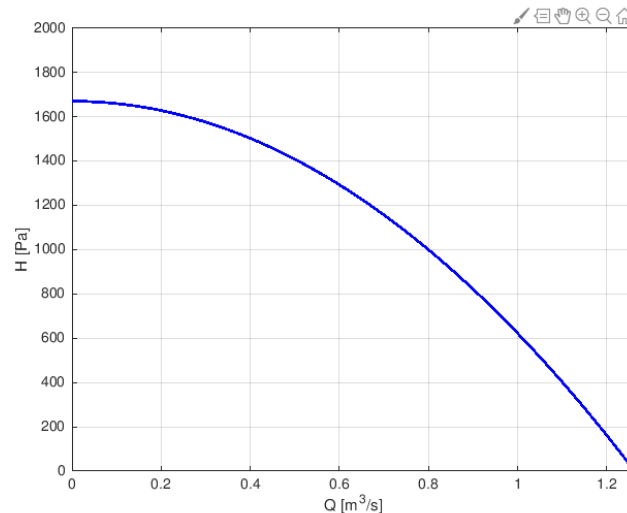
tím dosaženo zjednodušení výpočtu a případná chyba bude zanedbatelná. Vynecháním lineárního členu u vztahu 2.4 vyjde vztah

$$H = H_0 - K_V Q^2. \quad (2.6)$$

Stejná úprava bude provedena u vztahu 2.5

$$\psi = \psi_0 - \kappa \varphi^2. \quad (2.7)$$

Graf finální funkce 2.6 je vidět na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Tlaková charakteristika

Vztah mezi tlakovým číslem ψ_0 a tlakem naprázdno H_0 určuje následující vztah

$$\psi_0 = H_0 / (\rho u_2^2 / 2), \quad (2.8)$$

kde ρ je hustota a u_2 je obvodová rychlost. Pro převod mezi odporovým číslem κ a vnitřním odporu ventilátoru K_V bude použit vztah [2]

$$\kappa = K_V / [(4/\pi)^2 (\rho/2) (1/D_2^4)]. \quad (2.9)$$

Vztah mezi objemovým číslem φ a objemovým průtokem Q je následující

$$\varphi = Q / (\pi D_2^2 u_2 / 4). \quad (2.10)$$

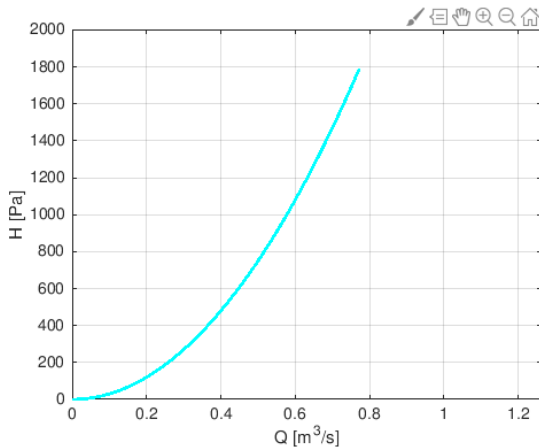
2.4.2. Pracovní bod

V předchozí kapitole (2.4.1) bylo ukázáno, že s rostoucím průtokem klesá tlak působící na lopatky podle vztahu 2.6. Na druhou stranu vnější odpor stroje s rostoucím průtokem kvadraticky roste. Vnější odpor stroje v závislosti na objemovém průtoku je určen vztahem [2]

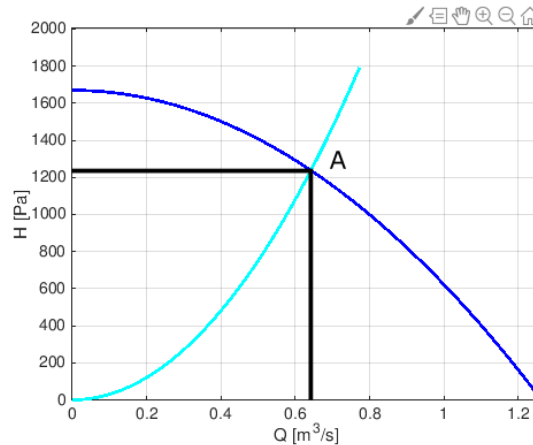
$$H_S = K_S Q^2, \quad (2.11)$$

kde K_S je odpor proudění. Grafem je parabola s počátkem v nule a jde vidět na obrázku 2.3a.

2.4. PODOBNOSTNÍ ČÍSLA



(a) Závislost odporu proudění na průtoku



(b) Nalezení pracovního bodu A

Obrázek 2.3: Hledání pracovního bodu

Při vynesení tlakové charakteristiky a odporu stroje do jednoho grafu lze najít jejich průnik a tím i pracovní průtok Q_p

$$Q_p = \sqrt{\frac{H_0}{K_S + K_V}}. \quad (2.12)$$

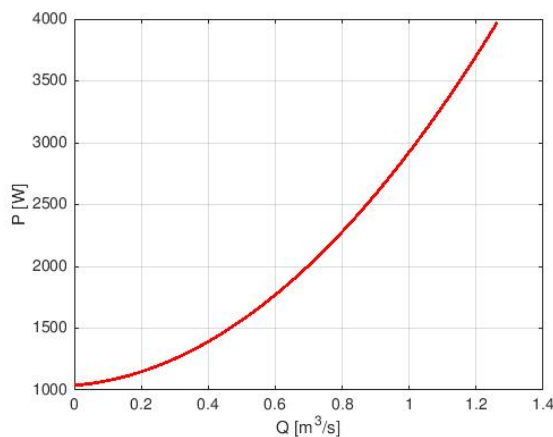
Pracovní bod určí parametry, při kterých bude ventilátor zatížen. Graf je možné vidět na obrázku 2.3b. Pracovní bod je v grafu označen jako bod A. Pomocí pracovního průtoku Q_p je možné určit potřebný příkon P_p , pracovní tlak H_p a v neposlední řadě účinnost η_p .

2.4.3. Příkonová charakteristika

Příkonová charakteristika vyjadřuje průběh požadovaného příkonu dodávaného ventilátoru v závislosti na objemovém průtoku $P = f(Q)$ [2]. Tato závislost byla také aproximována polynomem 2°

$$P = P_0 + M_1Q - M_2Q^2, \quad (2.13)$$

kde P_0 je počáteční příkon a M_1 , M_2 jsou koeficienty. Příkonová charakteristika je zobrazena na obrázku 2.4. Tento vztah (2.13) může být vyjádřena v bezrozměrném tvaru, kde



Obrázek 2.4: Příkonová charakteristika

příkonové číslo bude funkcí objemového čísla $\lambda = f(\varphi)$. V bezrozměrném tvaru vypadá vztah následovně

$$\lambda_p = \lambda_0 + \mu\varphi - \chi\varphi^2. \quad (2.14)$$

Příkonové čísla reprezentují λ_p a λ_0 . Další členy rovnice μ a χ jsou konstanty.

Převod mezi bezrozměrnými čísly a skutečnými veličinami pro příkonovou charakteristiku bude popsána v následujících vztazích [2]. Příkonové číslo je charakterizována vztahem

$$\lambda_0 = P_0 / [(\pi/4)(\varrho/2)u_2^3 D_2^2]. \quad (2.15)$$

Pro převedení mezi M_1 a μ bude použit vztah

$$\mu = M_1 / [(\varrho/2)u_2^2] \quad (2.16)$$

a pro převod mezi M_2 a χ bude použit vztah

$$\chi = M_2 / [(\varrho/2)(4/\pi)u_2 D_2^{-2}]. \quad (2.17)$$

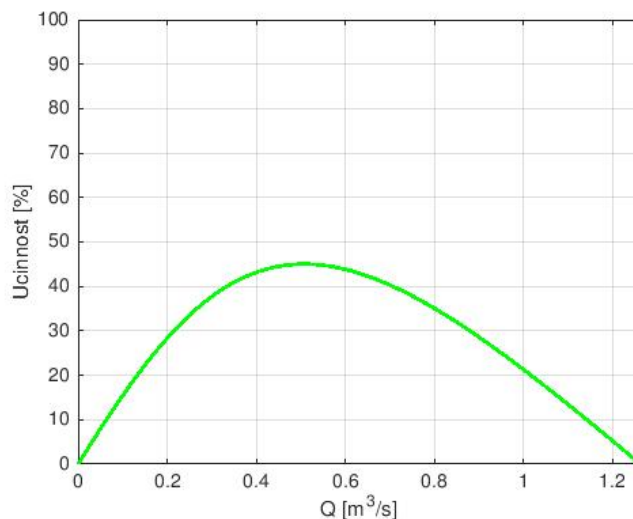
Vztah pro objemové číslo φ je uveden výše 2.10.

2.4.4. Účinnost

Pro výpočet účinnosti u ventilátorů bude dán do poměru aerodynamický výkon při průchodu ventilátorem vůči příkonu ventilátoru[2]. Vztah je popsán následovně

$$\eta = HQ/P, \quad (2.18)$$

kde všechny veličiny byly určeny v předchozích kapitolách. Graf účinnosti má tvar převrácené paraboly procházející nulou. Maximální hodnota účinnosti se pro každý ventilátor bude lišit. Záleží především na bezrozměrných číslech. Příklad grafu lze vidět na obrázku 2.5.

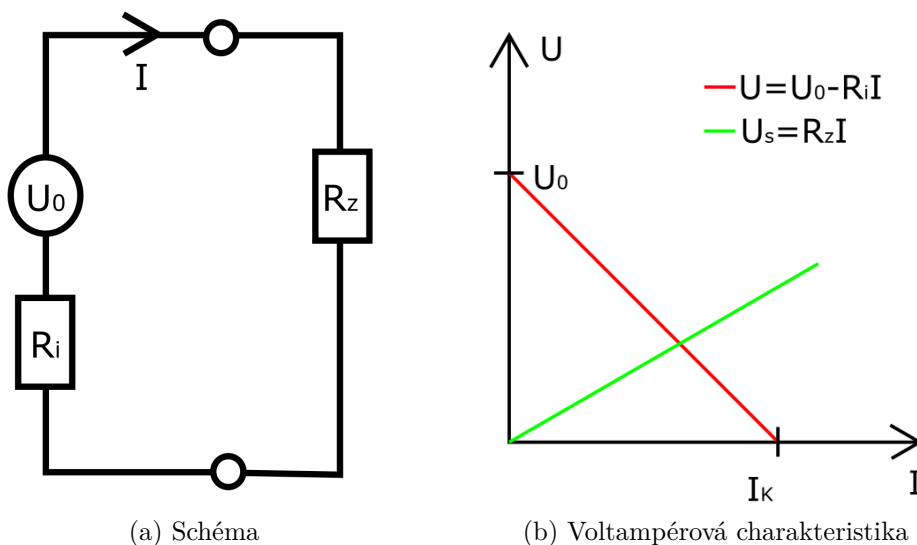


Obrázek 2.5: Účinnost

2.5. Fyzikální analogie s elektrickými obvody

V následující kapitole bude nastíněna podobnost mezi charakteristikou ventilátoru a charakteristikou elektrického obvodu. Pro zobrazení charakteristiky elektrického obvodu budou aplikovány zákony, které stanovili Ohm a Kirchhoff [3]. Ohmův zákon vyjadřuje závislost mezi napětím U a proudem I . První Kirchhoffův zákon popisuje zachování elektrického náboje. Druhý Kirchhoffův zákon popisuje zákon zachování energie. Aplikováním těchto zákonů na obvod (obrázek 2.6a) bude získána charakteristika na obrázku 2.6b.

Schéma elektrického obvodu a voltampérovou charakteristiku reálného zdroje napětí lze vidět na obrázcích 2.6.



Obrázek 2.6: Elektrický obvod

Na obrázcích 2.6 vystupuje napětí naprázdno U_0 , proud nakrátko I_K , vnitřní odpor zdroje R_i a odpor součástky R_z . Tuto charakteristiku lze popsat vztahy

$$U = U_0 - R_i I, \quad (2.19)$$

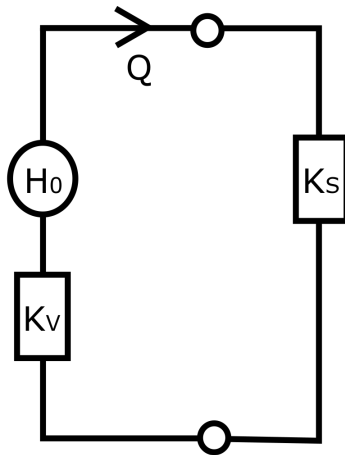
$$U_s = R_z I. \quad (2.20)$$

Porovnáním vztahů 2.19 a 2.20 a vyjádřením proudu I_p lze získat pracovní bod. Vztah vypadá

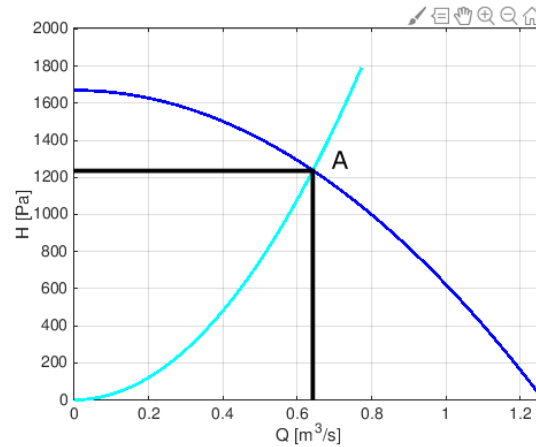
$$I_p = \frac{U_0}{R_z + R_i}. \quad (2.21)$$

Níže bude uvedeno schéma ventilátoru 2.7a a tlaková charakteristika 2.7b. Rovněž bude ukázáno porovnání vztahů pro lepší přehlednost. V levém sloupci je možné vidět vztahy pro elektrický obvod a v pravém sloupci pro ventilátor.

$U = U_0 - R_i I$ $U_s = R_z I$ $I_p = \frac{U_0}{R_z + R_i}$	$H = H_0 - K_V Q^2$ $H_s = K_S Q^2$ $Q_p = \sqrt{\frac{H_0}{K_S + K_V}}$
---	--



(a) Schéma ventilátoru



(b) Tlaková charakteristika

Obrázek 2.7: Ventilátor

Při srovnání je možné vidět jistou podobnost. Jediný znatelný rozdíl je druhá mocnina u průtoku Q oproti první mocnině u proudu I . To je způsobeno uvažováním turbulentního proudění ve ventilátoru [2]. Kdyby bylo uvažováno laminární proudění, charakteristika by se stala lineární a vypadala by obdobně jako charakteristika elektrického obvodu. Z toho lze vyvodit analogii

$$U \equiv H,$$

$$I \equiv Q,$$

$$R \equiv K.$$

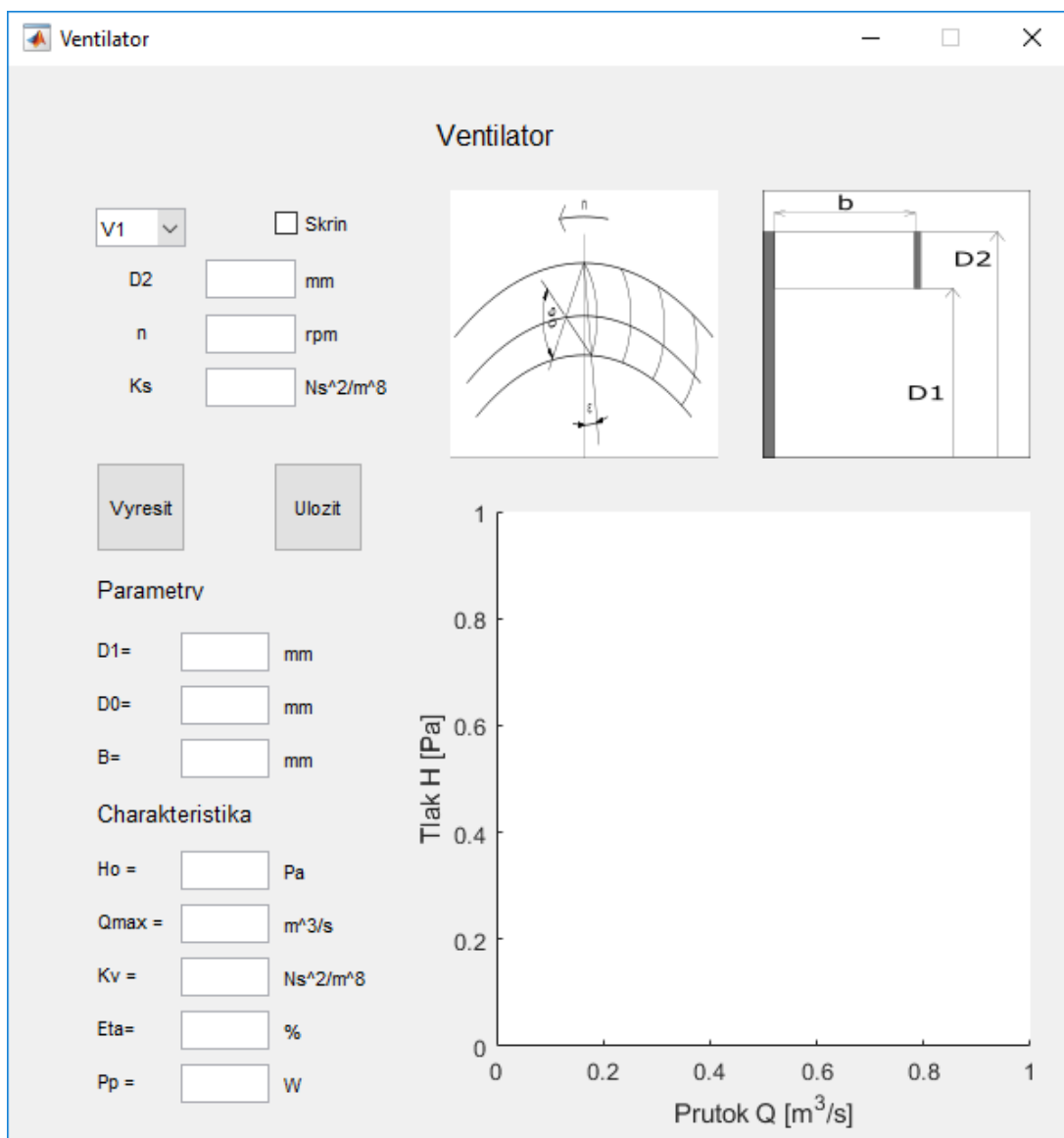
2.6. MATLAB

Matrix laboratory, dále jen MATLAB, je programové prostředí vyvíjeno firmou MathWorks. MATLAB umožňuje práci s maticemi, algoritmy, tvoření 2D, 3D grafy a uživatelského prostředí[7]. Během tvorby kalkulátoru využijeme především uživatelské prostředí, vykreslování 2D grafů a počítání s maticemi [4].

3. Průběh výpočtu

Při výpočtu ventilátoru je potřeba znát vstupní parametry a bezrozměrná čísla pro daný typ ventilátoru. Pro tuto bakalářskou práci bude vstupními parametry vnější průměr D_2 , otáčky n a odpor stroje K_S . Bezrozměrná čísla byla převzata z literatury [2], kde jsou uvedena pro 12 typů ventilátorů se spirální skříní i bez.

V uživatelském prostředí, které lze vidět na obrázku 3.1, bude zadán typ ventilátoru a vstupní parametry. Po stisknutí tlačítka "Vyresit" dojde k výpočtu vztahů, které byly ukázány dříve v kapitole 2.4. Zobrazí se rozměry ventilátoru, jmenovitě vnitřní průměry D_1 , D_0 a šířka lopatek b . Také se zobrazí hodnoty charakteristiky ventilátoru, jmenovitě tlak naprázdno H_0 , maximální průtok Q_{max} , odpor ventilátoru K_V , pracovní účinnost η_p a potřebný příkon P_p . Rovněž dojde k vykreslení grafu, kde budou znázorněny průběhy jednotlivých charakteristik daného ventilátoru. Vypočítaná data je možné uložit tlačítkem "Uložit". V dalších několika kapitolách budou ukázány a vysvětleny jednotlivé kroky.



Obrázek 3.1: Uživatelské prostředí

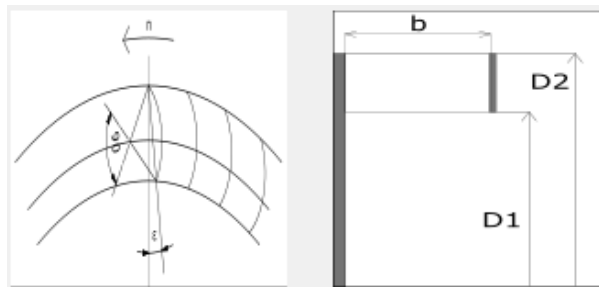
3.1. Zvolení typu ventilátoru

Před zahájením výpočtu je zapotřebí zvolit typ ventilátoru, pro který chceme výpočet provést. K tomu poslouží vysouvací menu a přepínač, jak můžeme vidět na obrázku 3.2. Pomocí vysouvacího menu bude zvolen jeden ze dvanácti typů ventilátorů a zaškrkává-



Obrázek 3.2: Vysouvací menu a přepínač

cího políčka přítomnost spirální skříně. Obě volby ovlivní bezrozměrná čísla, která jsou důležitá pro další výpočet. Při zvolení typu ventilátoru současně dojde k vykreslení nákresu ventilátoru. Pole pro vykreslení můžeme vidět na obrázku 3.3. Veškeré nákresy byly převzaty z literatury [2].



Obrázek 3.3: Pole pro nákresy ventilátoru

3.2. Vstupní parametry

Dalším krokem je zadání vstupních parametrů. Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly 3, vstupními parametry bude vnější průměr D_2 , otáčky n a odpor stroje K_S . Tyto parametry budou zadány do příslušných polí, jak lze vidět na obrázku 3.4. Vnější průměr bude zadán v milimetrech, otáčky v otáčkách za minutu a odpor stroje bude vyjádřen v Ns^2/m^8 . Po zadání a následného stisknutí tlačítka "Vyresit", které jde také vidět na obrázku 3.4, proběhne výpočet.

Obrázek 3.4: Zadání vstupních parametrů

3.3. Výstupní parametry

Na začátku výpočtu bude získáno číslo ventilátoru, přítomnost skříně a vstupní parametry. Vnější průměr D_2 bude převeden na metry. Pro výpočet bude také nezbytná hustota ρ , která bude nastavena pro vzduch při teplotě 20°C $\rho = 1.2$ a její jednotkou je kg/m^3 .

3.3.1. Rozměry

Na základě zvoleného typu ventilátoru a přítomnosti skříně budou kalkulátorem použita příslušná bezrozměrná čísla. K bezrozměrným číslům nezbytná pro určení tlakové, příkonové, účinnostní charakteristiky a odporu proudění, budou přidána i bezrozměrná čísla pro výpočet rozměrů ventilátoru. Jedná se o čísla ζ_1 , ζ_0 a ν , která byla rovněž převzata z literatury [2]. Tyto čísla určují vztah mezi vnitřní průměry D_1 , D_0 a šířku lopatek b .

Po zvolení bezrozměrných čísel následuje výpočet. Nejdříve kalkulátor spočítá rozměry ventilátoru. Toho bude docíleno za pomoci bezrozměrných čísel ζ_1 , ζ_0 a ν , kterými bude vynásoben vnější průměr D_2

$$D_1 = \zeta_1 D_2, \quad (3.1)$$

$$D_0 = \zeta_0 D_2, \quad (3.2)$$

$$b = \nu D_2, \quad (3.3)$$

a získány vnitřní průměry D_1 , D_0 a šířka lopatek b . Tyto rozměry budou převedeny na milimetry a vypsány do příslušných polí, jak můžeme vidět na obrázku 3.5.

Obrázek 3.5: Výstupní rozměry

3.3.2. Charakteristika

Nyní je možné přejít k výpočtu charakteristik ventilátoru. Prvně bude spočítána obvodová rychlost u_2 podle vztahu

$$u_2 = \pi D_2 n / 60 \quad (3.4)$$

a její jednotkou jsou m/s . Následně bude spočítán průtok nakrátko Q_{max} , který bude získán úpravou vztahu 2.10 a použitím bezrozměrného čísla φ_{max}

$$\varphi_{max} = Q_{max} / (\pi D_2^2 u_2 / 4). \quad (3.5)$$

Dále bude vypočítán tlak naprázdno H_0 , odpor ventilátoru K_V , příkonové číslo P_0 a koeficienty M_1 , M_2 . Výpočetní vztahy pro tyto čísla se nezměnili a jsou uvedeny v kapitole 2.4.

V závislosti na objemovém průtoku Q bude možné vykreslit všechny charakteristiky. Maximální hodnota objemového průtoku je rovna průtoku nakrátko Q_{max} . Graf charakteristiky bude vykreslen pro hodnoty 0 až Q_{max} . Délka kroku bude $Q_{max}/100$, čímž bude dosaženo dostatečné plynulosti grafu. Objemový průtok bude zapsán ve vektorovém tvaru o 101 prvcích. Vznikne tak vektor Q . Nyní bude vypočítána tlaková charakteristika podle vztahu 2.6. Tento vztah bude upraven pro práci s vektory a bude vypadat

$$H_i = H_0 - K_V Q_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100. \quad (3.6)$$

Obdobná úprava bude provedena pro příkonovou charakteristiku a odpor proudění, jak je možné vidět ve vztazích

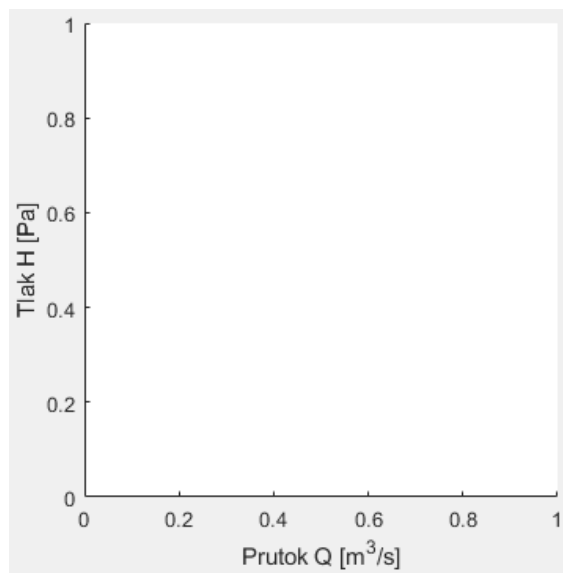
$$P_i = P_0 + M_1 Q_i - M_2 Q_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100. \quad (3.7)$$

$$H_{S_i} = K_S Q_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100. \quad (3.8)$$

Protože v maticovém zápisu je tlaková, příkonová charakteristika a objemový průtok, vztah pro účinnost bude vypadat

$$\eta_i = \frac{H_i Q_i}{P_i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100. \quad (3.9)$$

Všechny tyto závislosti budou vykresleny do jednoho grafu v příslušném poli, jak je možné vidět na obrázku 3.6. Pro lepší názornost budou jednotlivé grafy uzpůsobeny prostoru, ve kterém je graf zobrazen. K dalším výpočtům je zapotřebí získat pracovní bod A , proto



Obrázek 3.6: Pole pro vykreslení grafu

v dalším kroku bude nalezen průnik tlakové charakteristika H a odporu stroje H_S . Budou k tomu použity vztahy 2.6 a 2.11. Porovnáním těchto dvou rovnic a vyjádření průtoku

3.3. VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Q bude získáno umístění pracovního bodu společně s pracovním průtokem Q_p . Výsledný vztah vypadá následovně

$$Q_p = \sqrt{\frac{H_0}{K_V + K_S}}. \quad (3.10)$$

Nyní je známa pozice pracovního bodu A a je možné spočítat potřebný příkon P_p , pracovní tlak H_p a pracovní účinnost η_p

$$P_p = P_0 + M_1 Q_p - M_2 Q_p^2, \quad (3.11)$$

$$H_p = H_0 - K_V Q_p^2, \quad (3.12)$$

$$\eta_p = \frac{H_p Q_p}{P_p}. \quad (3.13)$$

Výstupní hodnoty tlaku naprázdno H_0 , maximálního průtoku Q_{max} , odporu ventilátoru K_V , pracovní účinnosti η_p a pracovního příkonu P_p budou vypsány do polí, která lze vidět na obrázku 3.7a. Pracovní účinnost η_p bude uvedena v procentech.

Charakteristika

Ho = Pa

Qmax = m³/s

Kv = Ns²/m⁸

Eta = %

Pp = W

(a) Výstupní charakteristika

Vent - Poznámkový blok

Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda

Ventilator 1 Skrin NE

Vstupni hodnoty

Vnejsi prumer D2 = NaN mm

Pocet otacek n = NaN rpm

Odpor stroje Ks = NaN Ns²/m⁸

Parametry

Vnitřni prumer D1 = NaN mm

Vnitřni prumer D0 = NaN mm

Sirka lopatek B = NaN mm

Charakteristika

Tlak na prazdno Ho = NaN Pa

Prutok nakratko Qmax = NaN m³/s

Odpor ventilatoru Kv = NaN Ns²/m⁸

Ucininnost Eta = NaN %

Prikon Pp = NaN W

(b) Textový dokument

Obrázek 3.7: Výstupy

3.3.3. Uložení

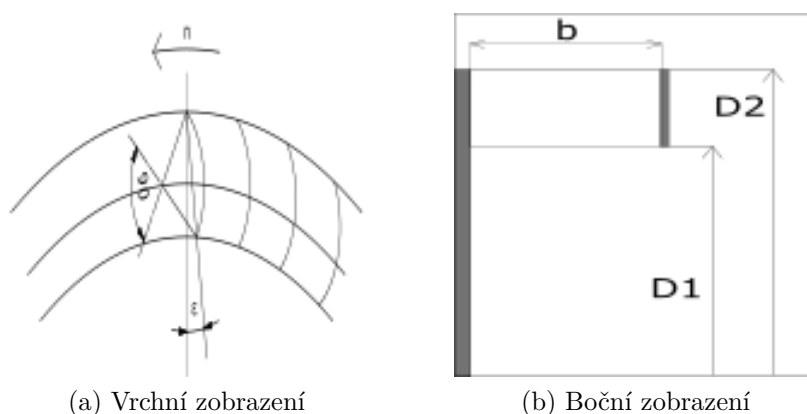
S těmito hodnotami je mnohdy potřeba dále pracovat, proto tyto údaje je možné uložit do externí aplikace. Toho bude dosaženo za pomoci tlačítka "Uložit". Toto tlačítko lze vidět na obrázku 3.4. Externí aplikací je textový dokument, který bude umístěn do složky, odkud byl kalkulátor spuštěn. Do textového dokumentu bude vypsán typ ventilátoru, přítomnost skříně, vstupní parametry (otáčky n , vnější průměr D_2 , odpor stroje K_S) a výstupní parametry (tlak naprázdno H_0 , maximální průtok Q_{max} , odpor ventilátoru K_V , pracovní účinnost η_p , pracovní příkon P_p). Podobu tohoto textového dokumentu jde vidět na obrázku 3.7b.

4. Příklad

V této kapitole bude celý výpočet (kapitola 3) znázorněn na ukázkovém příkladu. V první podkapitole 4.1 budou uvedeny veškeré výpočty. V dalších podkapitolách 4.2 a 4.3 budou zobrazeny pouze výstupní uživatelské prostředí.

4.1. Ventilátor V2S3

V tomto příkladu bude zvolen ventilátor V2S3. Dojde k zobrazení nákresů daného ventilátoru, jak je možné vidět na obrázku 4.1. Nákrasy byly převzaty z literatury [2].



Obrázek 4.1: Nákras ventilátoru [2]

Hodnoty vstupních parametrů jsou zvoleny

$$\begin{aligned} D_2 &= 280\text{mm}, \\ n &= 2920\text{min}^{-1}, \\ K_S &= 5000\text{Ns}^2/\text{m}^8. \end{aligned}$$

Po stisknutí tlačítka "Vyresit" proběhne vyhledání příslušných bezrozměrných čísel. Tato čísla lze vidět v tabulce 4.1, která byla rovněž převzata z literatury [2].

Ventilátor	Skříň	ψ_0	φ_{max}	κ	λ_0	μ	χ	ζ_1	ζ_0	ν
V2	S3	1.518	0.479	6.62	0.358	0.198	-4	0.7	0.7	0.36

Tabulka 4.1: Bezrozměrná čísla ventilátoru V2S3 [2]

Nejdříve budou vypočítány rozměry ventilátoru podle vzorců 3.1, 3.2 a 3.3. Vzorce po použití vypadají

$$\begin{aligned} D_1 &= \zeta_1 D_2 = 0.7 \cdot 280 = 196\text{mm}, \\ D_0 &= \zeta_0 D_2 = 0.7 \cdot 280 = 196\text{mm}, \\ b &= \nu D_2 = 0.36 \cdot 280 = 100.8\text{mm}. \end{aligned}$$

Dále budou použity vzorce z kapitol 2.4 a 3.3.2. Zde je už vnější průměr D_2 převeden na metry. Výpočet obvodové rychlosti u_2 je

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.28 \cdot 2920}{60} = 42.8094\text{m/s}.$$

Výpočet tlaku naprázdno H_0 je roven

$$H_0 = \frac{\psi_0 \rho u_2^2}{2} = \frac{1.518 \cdot 1.2 \cdot 42.8094^2}{2} = 1669.2 Pa.$$

Výpočet pro průtok nakrátko Q_{max} se rovná

$$Q_{max} = \frac{\varphi_{max} \pi D_2^2 u_2}{4} = \frac{0.479 \cdot \pi \cdot 0.28^2 \cdot 42.8094}{4} = 1.263 m^3/s.$$

Výpočet odporu ventilátoru K_V vypadá takto

$$K_V = \frac{4^2 \kappa \rho}{2\pi^2 D_2^4} = \frac{16 \cdot 6.62 \cdot 1.2}{2 \cdot \pi^2 \cdot 0.28^4} = 1047.6 N s^2/m^8.$$

Výpočet výkonu naprázdno P_0 je roven

$$P_0 = \frac{\lambda_0 \pi \rho u_2^3 D_2^2}{8} = \frac{0.358 \cdot \pi \cdot 1.2 \cdot 42.8094^3 \cdot 0.28^2}{8} = 1037.7 W.$$

Výpočet koeficientů M_1 a M_2 je následný

$$M_1 = \frac{\mu \rho u_2^2}{2} = \frac{0.198 \cdot 1.2 \cdot 42.8094^2}{2} = 217.7186 kgm^{-1} s^{-2},$$

$$M_2 = \frac{\chi \rho 4 u_2}{2\pi D_2^2} = \frac{-4 \cdot 1.2 \cdot 4 \cdot 42.8094}{2 \cdot \pi \cdot 0.28^2} = -1668.6 kgm^{-4} s^{-1}.$$

Nyní budou použity vzorce 3.6-3.9 pro výpočet jednotlivých charakteristik. Vektor průtoku Q vypadá

$$Q = [Q_0 \quad Q_1 \quad Q_2 \quad \dots \quad Q_{100}] = [0 \quad 0.0126 \quad 0.0253 \quad \dots \quad 1.263].$$

Výpočet vektoru tlaku H je

$$H_i = H_0 - K_V Q_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100,$$

$$H_0 = 1669.2 Pa,$$

$$H_1 = 1669.2 - 1047.6 \cdot 0.0126^2 = 1669 Pa,$$

$$H_2 = 1669.2 - 1047.6 \cdot 0.0253^2 = 1668.5 Pa,$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$H_{100} = 1669.2 - 1047.6 \cdot 1.263^2 = 0 Pa.$$

Výpočet vektoru příkonu P je roven

$$P_i = P_0 + M_1 Q_i - M_2 Q_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100,$$

$$P_0 = 1037.7 W,$$

$$P_1 = 1037.7 + 217.7186 \cdot 0.0126 + 1668.6 \cdot 0.0126^2 = 1040.7 W,$$

$$P_2 = 1037.7 + 217.7186 \cdot 0.0253 + 1668.6 \cdot 0.0253^2 = 1044.2 W,$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$P_{100} = 1037.7 + 217.7186 \cdot 1.263 + 1668.6 \cdot 1.263^2 = 3972.7 W.$$

4.1. VENTILÁTOR V2S3

Výpočet vektoru odporu stroje H_S se rovná

$$\begin{aligned} H_{S_i} &= K_S Q_i^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100, \\ H_{S_0} &= 0 Pa, \\ H_{S_1} &= 5000 \cdot 0.0126^2 = 0.9 Pa, \\ H_{S_2} &= 5000 \cdot 0.0253^2 = 3.5 Pa, \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ H_{S_{100}} &= 5000 \cdot 1.263^2 = 8762.2 Pa. \end{aligned}$$

Výpočet vektoru účinnosti η vypadá následovně

$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{H_i Q_i}{P_i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 100, \\ \eta_0 &= 0, \\ \eta_1 &= \frac{1669 \cdot 0.0126}{1040.7} = 0.0202, \\ \eta_2 &= \frac{1668.5 \cdot 0.0253}{1044.2} = 0.0403, \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \eta_{42} &= \frac{1401.9 \cdot 0.5051}{1573.3} = 0.4501, \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \eta_{100} &= \frac{0 \cdot 1.263}{3972.7} = 0. \end{aligned}$$

Další výpočtem bude nalezení pracovního bodu, pracovního průtoku Q_p , podle vztahu 3.10. Tento průtok bude dále použit pro výpočet pracovního příkonu P_p , pracovního tlaku H_p a pracovní účinnosti η_p dle vztahů 3.11-3.13. Výpočet pracovního průtoku Q_p je následující

$$\begin{aligned} Q_p &= \sqrt{\frac{H_0}{K_V + K_S}}, \\ Q_p &= \sqrt{\frac{1669.2}{1047.6 + 5000}}, \\ Q_p &= 0.5254 m^3/s. \end{aligned}$$

Příkon při pracovním průtoku je roven

$$\begin{aligned} P_p &= P_0 + M_1 Q_p - M_2 Q_p^2, \\ P_p &= 1037.7 + 217.7186 \cdot 0.5253 + 1668.6 \cdot 0.5253^2, \\ P_p &= 1612.59 W. \end{aligned}$$

Pracovní tlak H_p je roven

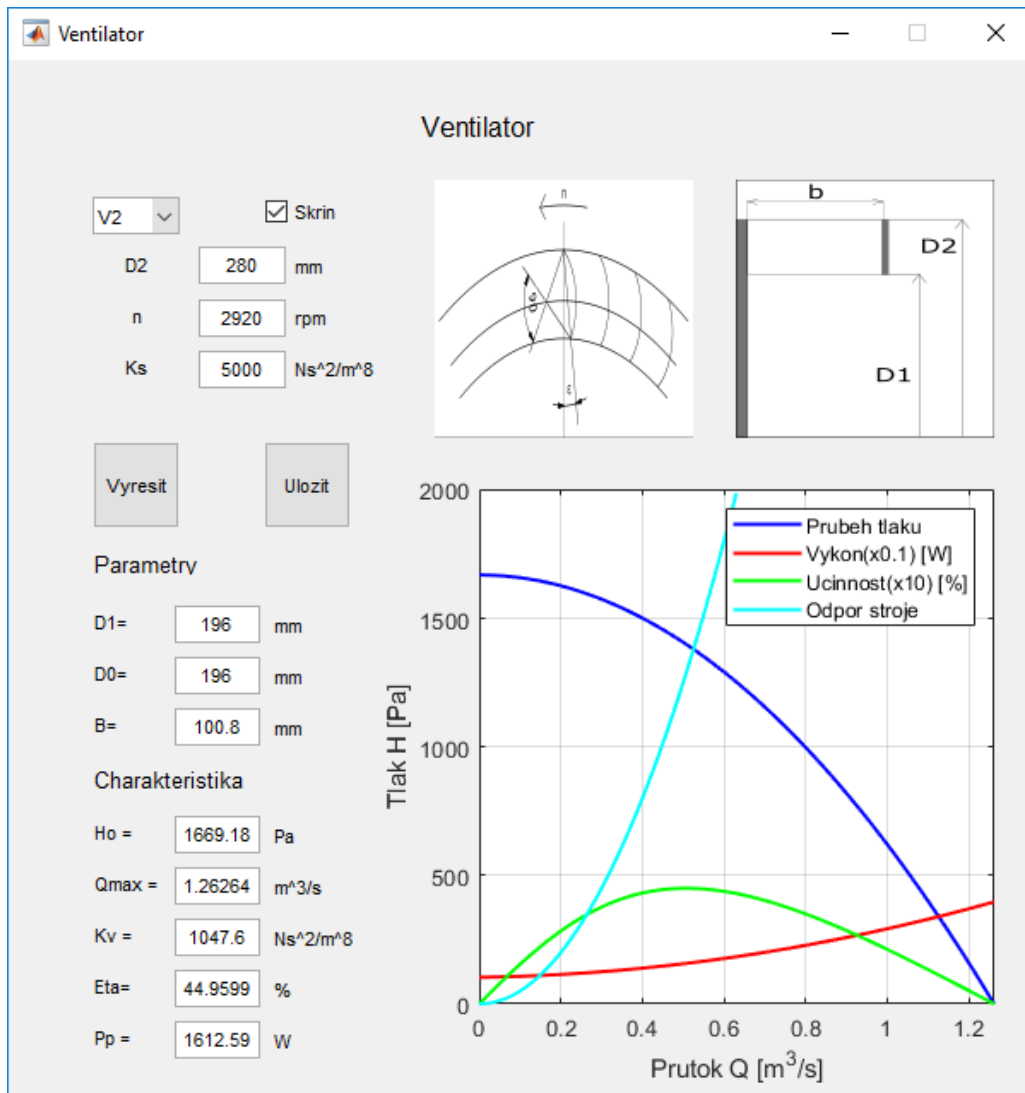
$$\begin{aligned}H_p &= H_0 - K_V Q_p^2, \\H_p &= 1669.2 - 1047.6 \cdot 0.5254^2, \\H_p &= 1380 Pa.\end{aligned}$$

Pracovní účinnost je znázorněna výpočtem

$$\begin{aligned}\eta_p &= \frac{H_p Q_p}{P_p}, \\ \eta_p &= \frac{1380 \cdot 0.5254}{1612.59}, \\ \eta_p &= 44.96\%.\end{aligned}$$

V posledním kroku budou vypsány veškeré výstupní parametry, které jsou uvedeny v kapitole 3.3. Rovněž bude vykreslen graf tlakové charakteristiky, příkonové charakteristiky, odporu proudění a účinnosti. Celé uživatelské prostředí je možné vidět na obrázku 4.2. Data je rovněž možné uložit do textového souboru za pomoci tlačítka "Uložit". Textový dokument s hodnotami lze vidět na obrázku 4.3.

4.1. VENTILÁTOR V2S3



Obrázek 4.2: Výstupní uživatelské prostředí ventilátoru V2S3

```

Vent - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
Ventilator 2 Skrin ANO

Vstupní hodnoty
Vnější průměr D2 = 280.00 mm
Počet otacek n = 2920 rpm
Odpor stroje Ks = 5000.00  $\text{Ns}^2/\text{m}^8$ 

Parametry
Vnitřní průměr D1 = 196.00 mm
Vnitřní průměr D0 = 196.00 mm
Šířka lopatek B = 100.80 mm

Charakteristika
Tlak na prázdko Ho = 1669.18 Pa
Prutok nakratko Qmax = 1.26  $\text{m}^3/\text{s}$ 
Odpor ventilatoru Kv = 1047.60  $\text{Ns}^2/\text{m}^8$ 
Učinnost Eta = 44.96 %
Príkon Pp = 1612.59 W
    
```

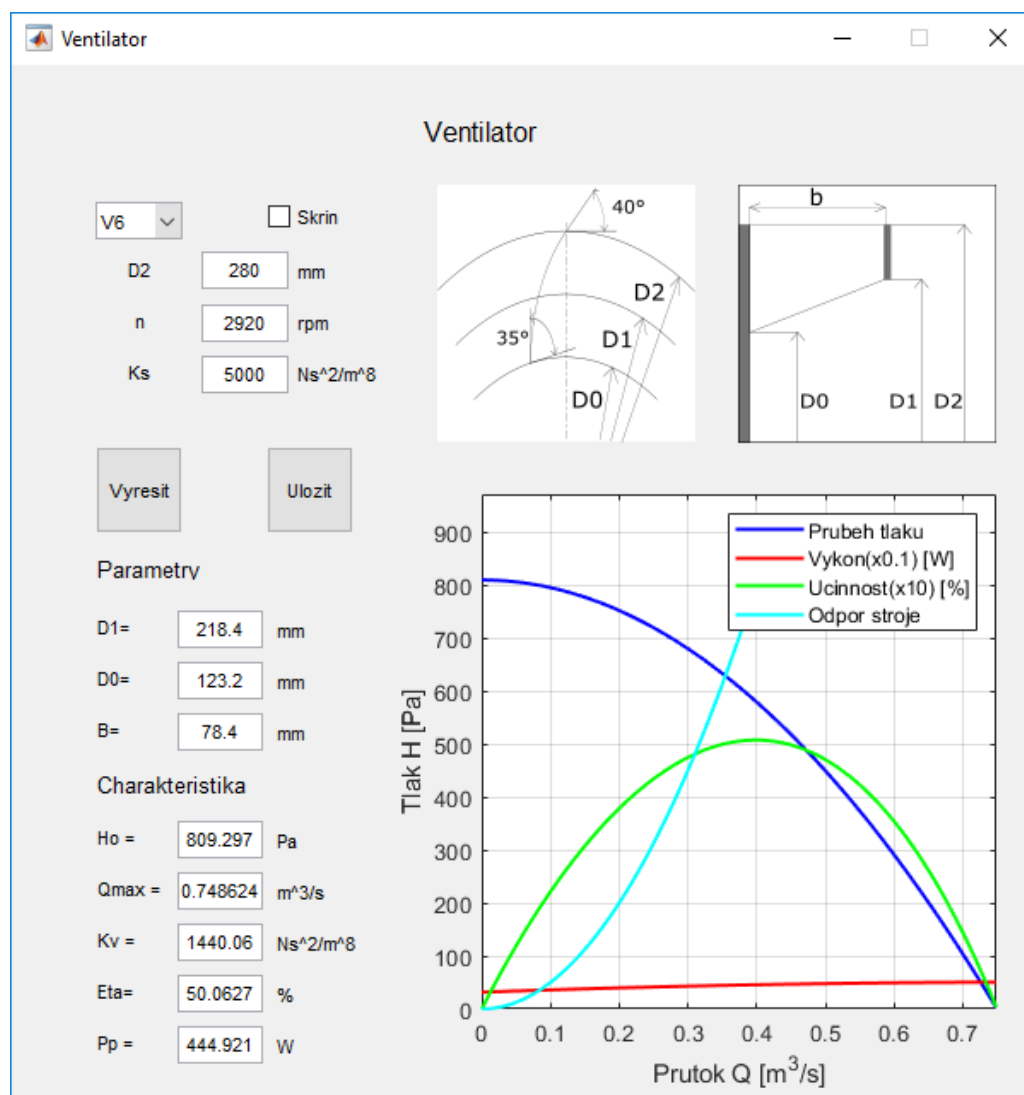
Obrázek 4.3: Výstupní textový dokument

4.2. Ventilátor V6

V tomto příkladu bude zvolen ventilátor V6 bez spirální skříně. Bezrozměrná čísla byla převzata z literatury [2] a je možné je vidět v tabulce 4.2. Vstupní parametry byly zachovány z prvního příkladu 4.1. Výstupní uživatelské prostředí lze vidět na obrázku 4.4.

Ventilátor	Skříň	ψ_0	φ_{max}	κ	λ_0	μ	χ	ζ_1	ζ_0	ν
V6	-	0.736	0.284	9.1	0.109	0.421	0.67	0.78	0.44	0.28

Tabulka 4.2: Bezrozměrná čísla ventilátoru V6 [2]



Obrázek 4.4: Výstupní uživatelské prostředí ventilátoru V6

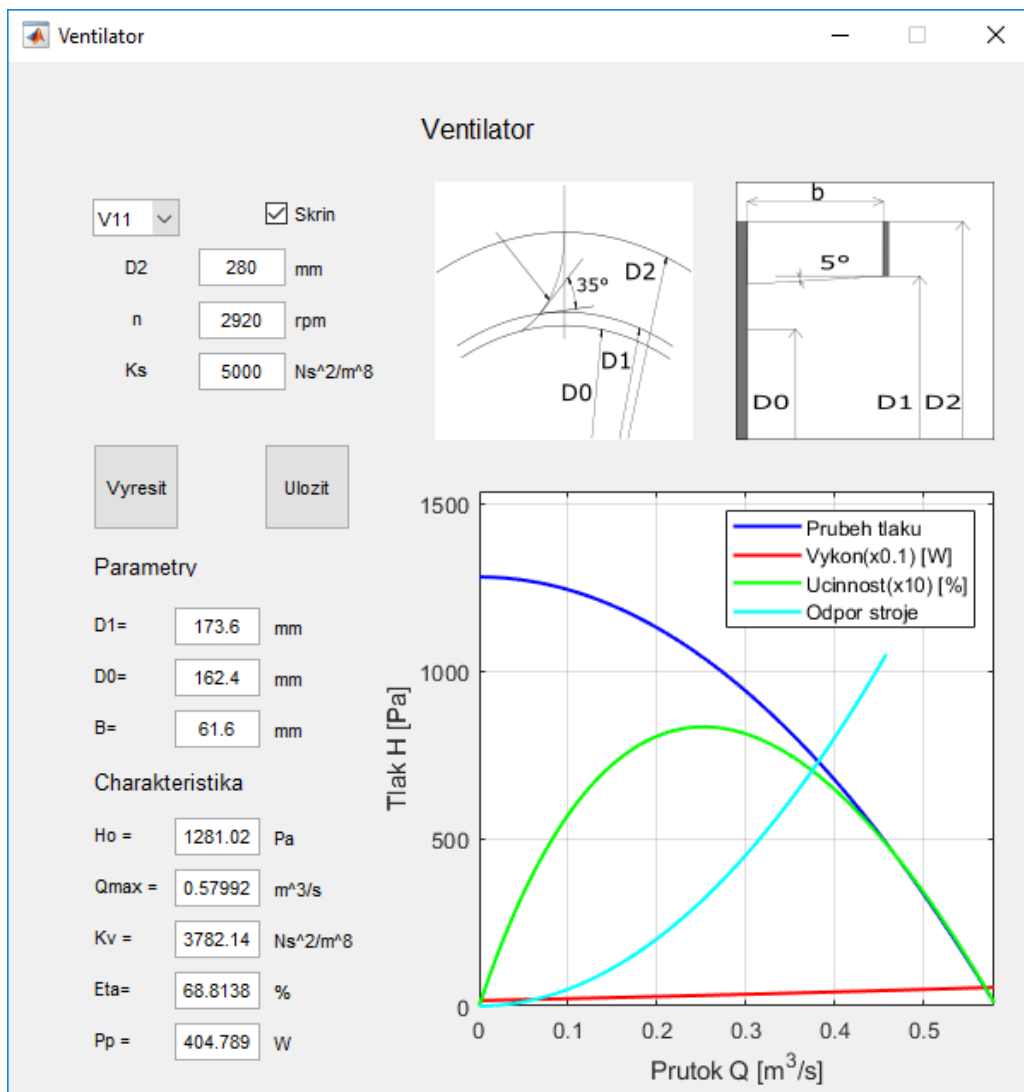
4.3. VENTILÁTOR V11S1

4.3. Ventilátor V11S1

V této podkapitole byl zvolen ventilátor V11S1. Bezrozměrná čísla pro tento ventilátor je možné vidět v tabulce 4.3. Vstupní parametry zůstávají stejné jako v prvním příklad 4.1. Výstupní uživatelské prostředí je zobrazeno na obrázku 4.5.

Ventilátor	Skříň	ψ_0	φ_{max}	κ	λ_0	μ	χ	ζ_1	ζ_0	ν
V11	S1	1.165	0.22	23.9	0.055	0.514	-0.485	0.62	0.58	0.22

Tabulka 4.3: Bezrozměrná čísla ventilátoru V11S1 [2]



Obrázek 4.5: Výstupní uživatelské prostředí ventilátoru V11S1

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo naprogramovat návrhový kalkulátor pro elektrické stroje. Nejdříve byl vymezen pojem ventilátor a uvedeny základní rovnice pro výpočet charakteristik. Aby řešení bylo univerzální, byla použita podobnostní čísla, která lze aplikovat na jakýkoliv případ. Pomocí nich byla určena tlaková, příkonová a účinnostní charakteristika ventilátoru. Porovnáním tlakové charakteristiky a odporu stroje bylo možné najít pracovní bod a určit příslušné pracovní podmínky, při kterých bude ventilátor pracovat.

Další kapitole se věnovala uživatelskému prostředí a výpočtu. Nejdříve bylo ukázána orientace v uživatelském prostředí a práce s ním. Na začátku výpočtu byly uvedeny vstupní parametry, kterými byly vnější průměr D_2 , otáčky n a odpor stroje K_S . Na základě těchto parametrů byl zobrazen průběh výpočtu, který vedl až k výstupním parametrům a vykreslení příslušných charakteristik do grafu. Výstupními parametry byly tlak naprázdno H_0 , průtok nakrátko Q_{max} , odpor ventilátoru K_V , pracovní účinnost η_p a pracovní příkon P_p . S výstupními parametry je mnohdy potřeba dále pracovat, a proto je možné veškeré informace uložit do textového souboru.

V poslední kapitole byly uvedeny tři příklady pro lepší názornost. U prvního příkladu byl uveden celý výpočet včetně dosazení do jednotlivých vzorců. Rovněž bylo zobrazeno výstupní uživatelské prostředí a textový soubor. Další dva příklady měli stejné vstupní parametry jako první příklad, ale byl zvolen jiný typ ventilátoru. Tyto příklady byly uvedeny pro porovnání s výstupními parametry prvního příkladu.

Na základě porovnání příkladů, lze vyvodit, že je možné dosáhnout velmi rozdílných výsledků při stejných vstupních parametrech. Ventilátory se liší, jak v rozměrech, tak v jednotlivých charakteristikách. Hodnoty maximálních účinností jsou také pro každý ventilátor rozdílné. Toto vše je ovlivňováno podobnostními čísly daného typu ventilátoru.

Kalkulátor byl navrhnut pro 12 typů ventilátorů o různých tvarech a rozměrech. Do kalkulátoru je případně možné doplnit další typy ventilátorů o rozdílných podobnostních číslech.

Literatura

- [1] ČERMÁK, Jan. *Ventilátory*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1974.
- [2] HAK, J.; OŠLEJŠEK, O.: *Výpočet chlazení elektrických strojů. 1.díl*. VUES Brno, 1973.
- [3] KVASIL, Josef. *Elektrické lineární obvody: celostátní učebnice pro vysoké školy*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1967.
- [4] Makers of MATLAB and Simulink *MATLAB & Simulink* [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.05.2019]. Dostupné z: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/>>
- [5] NOVÝ, Richard. *Ventilátory*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 101 s. : il., tabulky, grafy. ISBN 80-01-02385-0.
- [6] ONDRUŠKA, Emil a Antonín MALOUŠEK. *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [7] ZAPLATÍLEK, Karel. *MATLAB®: tvorba grafického uživatelského rozhraní*. Brno: Tribun EU, 2014. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-263-0861-4.

6. Seznam použitých zkratek a symbolů

Q	objemový tok (průtok)
Q_{max}	průtok nakrátko
v	rychlost proudění
S	průřez
$p_{s,d,c}$	tlak (statický, dynamický, celkový)
ρ	hustota
H	tlak
H_0	tlak naprázdno
ψ	tlakové číslo
σ	vírové číslo
φ	objemové číslo
κ	odporové číslo
u_2	obvodová rychlost
$D_{0,1,2}$	průměr
H_S	odpor stroje
K_S	odpor proudění
P	příkon
$\lambda_{p,0}$	příkonové číslo
μ	konstanta
χ	konstanta
η	účinnost
U	napětí
U_0	napětí naprázdno
I	proud
I_K	proud nakrátko
R_i	vnitřní odpor zdroje

R_z	odpor součástky
MATLAB	Matrix Laboratory
C	koeficient
K_V	koeficient
$M_{1,2}$	koeficienty
$\zeta_{0,1}$	konstanta
ν	konstanta